

Aus dem Institut für animalische Physiologie der Universität

Frankfurt am Main

(Direktor : Prof. Dr. K. Wexler)

Untersuchungen über das Verhalten der Kraft

bei der willkürlichen Kontraktion

der menschlichen Skelettmuskulatur.

Inaugural - Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der gesamten Medizin

der hohen Medizinischen Fakultät

der Johann Wolfgang Goethe-Universität

zu Frankfurt am Main

vorgelegt von

Reinhard Kratz

aus Berlin

Frankfurt/M. 1961

1962

Dekan: Prof. Dr. K. Herzberg

Referent: Prof. Dr. K. Wezler

Korreferent: Prof. Dr. J. Zutt

Mündliche Prüfung: 26. Januar 1962



An der menschlichen Willkürmotorik ist eine größere Anzahl von nervösen Zentren und Leitungsbahnen beteiligt, über deren Wirkungsweise und Vermaschung man sich heute etwa folgende Vorstellungen macht:

Der Ausgangspunkt einer jeden Willkürbewegung ist die motorische Großhirnrinde, deren Impulse über die Pyramidenbahn zum Vorderhorn des Rückenmarkes (RM) ziehen. Die corticalen motorischen Erregungen durchlaufen aber nicht unverändert den Weg von der Großhirnrinde zum RM, sondern sie werden von verschiedenen Seiten auf Grund einer Rückkoppelung modifiziert. So ist zum Beispiel bekannt, daß ein Teil der Erregungen dem Ncl. ruber zufließt, der selbst wieder Erregungen aus dem Kleinhirn, welches das höchste Organ der Proprioceptivität ist, erhält (GRANIT, HOLMGREN, MERTON (8)). Vom Ncl. emboliformis des Kleinhirns strömen Impulse zum Zentralkern des Thalamus, der Verbindungen zum Striatum hat, welches wieder das Pallidum beeinflusst, das über afferente Bahnen zum prämotorischen Anteil der Großhirnrinde verfügt. Der rote Kern kombiniert cortical - motorische, cerebellare und pallidäre Impulse, er bildet im extrapyramidal - motorischen System ein wichtiges Schalt- und Auswertezentrum. (HASSLER (11) und LANDOIS - ROSEMAN (18)).

Ohne näher auf die Einzelheiten dieser komplizierten Strukturen einzugehen, sieht man, daß auf dieser oberen Ebene der nervösen Gebilde der Willkürmotorik ein in sich geschlossener Informationskreislauf vorliegt, bei dessen Durchlaufen die Erregungen Auswertezentren passieren und sich selbst rückläufig beeinflussen (s. Abb. 1) . In einem Nebenschluß dieses Kreises liegen die Augen mit ihren Kern-

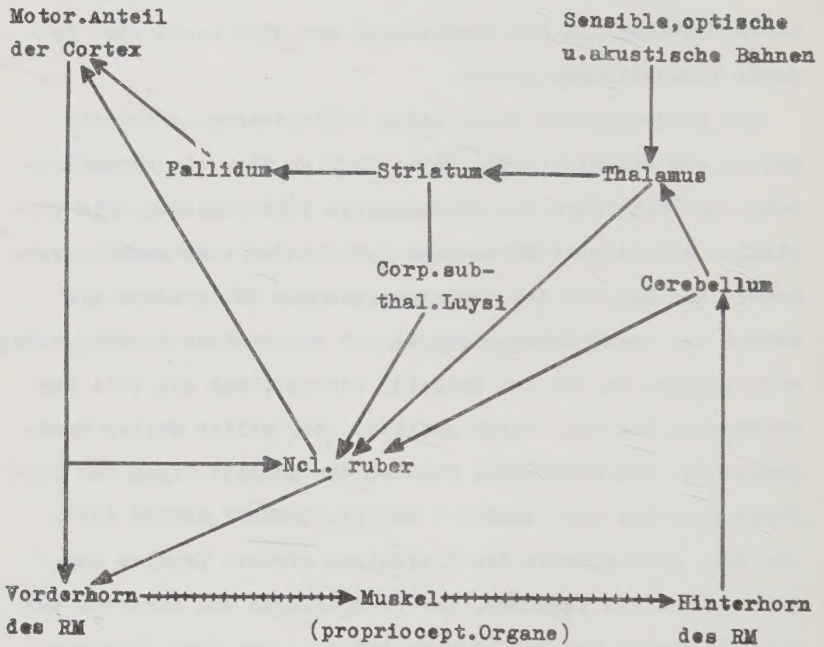


Abb. 1

Schema einiger zentralnervöser Informationskreise, die an der Willkürbewegung beteiligt sind.

(Nach HASSLER (11) und LANDOIS - ROSEMAN (18)).

gebieten, die bei der gezielten Bewegung als Fühler eines "äußeren" Regelkreises fungieren (KÜPFMÜLLER u. POKLEKOWSKI (17)), indem sie diskontinuierlich alle 100 - 110 ms einen Meßwert aufnehmen und dem "inneren" Bewegungsregler zu-leiten (VOSSIUS (25)).

In dem Vorderhorn des RM liegen die Vorderhornzellen, deren Fortsatz als efferente motorische α -Faser zum Muskel zieht; an einer solchen Vorderhornzelle enden nach den Untersuchungen von BARR (1) über 1000 Synapsen, die sicher von einer viel kleineren Anzahl von Zellen stammen, von denen nur eine Kombination mehrerer zu einer Entladung führen kann; nach TÖNNIES (24) sind mindestens 30 eng gruppierte Endösen notwendig, um die Zelle zu entladen. Mit der alten Vorstellung von der einzigen motorischen Endstrecke, die besagt, daß nur eine Sorte Nerven den Muskel efferent innerviert, lassen sich alle vorkommenden physiologischen und vor allem pathologischen Phänomene nur schwer erklären. BOEKE (2) hat neben den bekannten dickeren α -Fasern noch dünnere, als γ -Fasern bezeichnete efferente Nerven entdeckt, die die intrafusalen Muskelfasern in den Muskelspindeln (MS) innervieren. Diese intrafusalen Fasern sind quergestreifte Muskelfasern in der fibrösen Hülle der MS; ihre Innervation bringt keine meßbare Kraftaufwendung, sondern bewirkt eine Verstellung der Empfindlichkeit der MS, indem diese gespannt werden (s. BURCKHARDT (3)). Auch HÄGGQVIST (9) hat sich für eine doppelte efferente Innervation ausgesprochen; eine einzige motorische Endstrecke existiert nicht.

Der Muskel besitzt zwei verschiedene Sorten von Sinnesorganen, mit deren Hilfe seine Tätigkeit reguliert wird :

1. Die Muskelspindeln, die sowohl für Dehnung als auch für eine Dehnungsänderung in der Zeit empfindlich sind; sie besitzen also einen Anteil mit einer Proportionalempfindlichkeit und einen mit einer Differentialquotientenempfindlichkeit. - 2. Die Sehnenspindeln (SS) oder GOLGI-Organen werden durch Spannung adäquat gereizt, auch sie besitzen eine, wenn auch geringe Empfindlichkeit für Spannungsänderungen in der Zeiteinheit. Die SS verfügen im Gegensatz zu den MS nicht über eine eigene efferente Innervation, ihre Empfindlichkeit kann nicht verstellt werden.- Von diesen beiden Sinnesorganen verlaufen afferente Fasern in das Hinterhorn des RM, wo sowohl eine Umschaltung auf die efferenten Fasern zur Muskulatur als auch auf aufsteigende sensorische Bahnen erfolgt. (s. BURCKHARDT (3)).

Man sieht, daß auch auf der unteren Ebene der menschlichen Willkürmotorik das Prinzip des geschlossenen Informationskreislaufes verwirklicht ist, wodurch eine dauernde Kontrolle des Kontraktionserfolges möglich wird.

Wie hat man sich nun den Ablauf des nervösen Geschehens während der Willkürkontraktion vorzustellen ?

1. Es kann die Efferenz in den γ -Fasern erhöht werden, daraus resultiert eine Kontraktion der intrafusalen Fasern der MS, dadurch senden letztere vermehrt afferente Impulse aus und reagieren so, als ob sie gedehnt worden wären und nun einer Kontraktion des Gesamtmuskels bedürften, um wieder ihren entdehnten Ruhezustand zu erreichen. (HOFFMANN (13); ELDRED, GRANIT u. MERTON (5)).

2. Im RM kann eine Änderung des Verstärkungsfaktors vorgenommen werden, indem das Übersetzungsverhältnis der einlaufen-

den Erregungen aus den MS auf die motorischen Vorderhornzellen verändert wird. Soll der Sollwert im RM verschoben werden, dann muß der Arbeitspunkt der Vorderhornzellen ver-
stellt werden, d. h. es muß eine additive Änderung der Bezugs-
impulsfrequenz vorgenommen werden.

Eine von höheren Zentren direkt zur motorischen Endplatte durchlaufende α -Efferenz soll nach MERTON (20) nur bei sehr heftigen Willkürbewegungen vorkommen.

Die oben kurz skizzierte Auffassung von der Willkürkon-
traktion ist unter Berücksichtigung der Regeltheorie ent-
standen; dieser liegen folgende physikalischen Prinzipien
zu Grunde:

Eine Regelung liegt dann vor, wenn auf den Ablauf einer
Größe durch Information über diese selbst eingewirkt wird;
die Signalweitergabe erfolgt nur in einer Richtung, wodurch
eine Rückwirkungsfreiheit gewonnen wird. Der Regelkreis
enthält folgende Bauglieder (OPPELT (21,22); SCHÄFER (23)):

1. Die Regelstrecke als eine Anordnung, in der eine Regel-
größe gegen unbeabsichtigte Einflüsse einer Störgröße kon-
stant auf dem Sollwert gehalten werden soll.

2. Den Fühler, welcher auf die Regelgröße anspricht; deren
Vorzeichen wird umgekehrt, eine positive Information wird
zu einer negativen derselben Größe; man nennt diesen Vor-
gang die Gegenkoppelung. Die Regelgröße wird dann mit der
Führungsgröße in Form einer Subtraktion verglichen; das Er-
gebnis bildet den Eingangswert des Reglers.

3. Den Regler, welcher die Stellgröße abgibt, die über

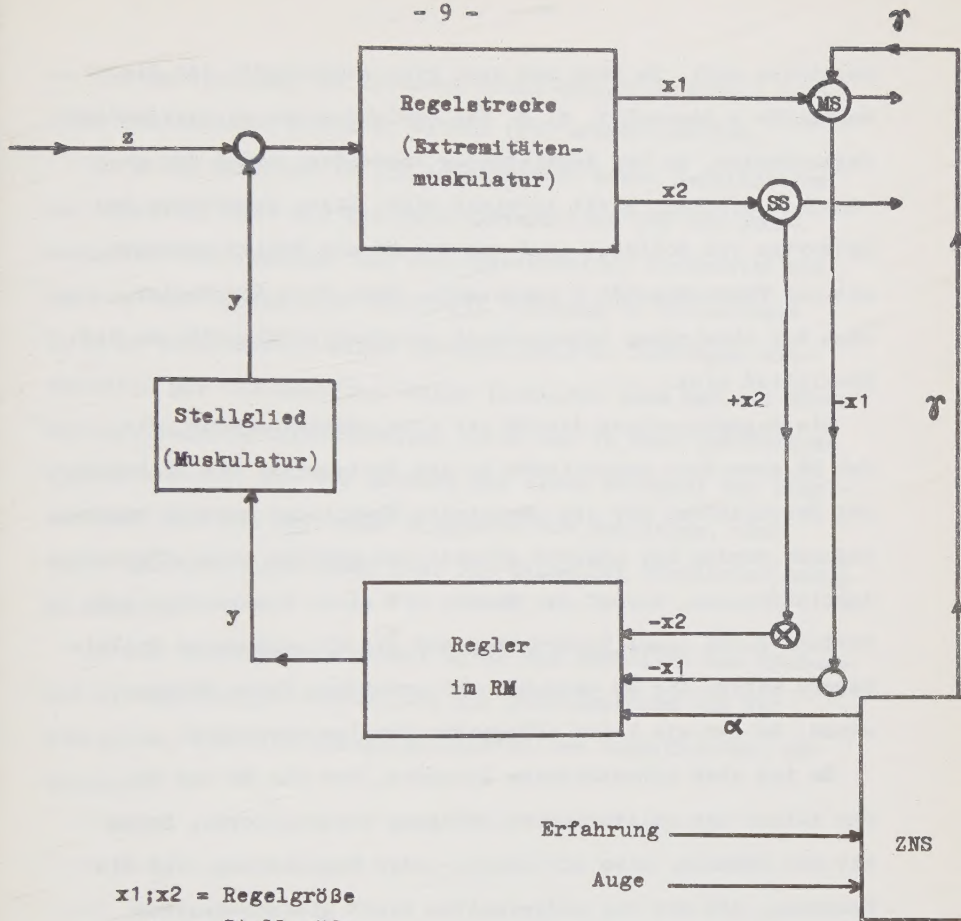
4. das Stellglied die Eingangsgröße der Regelstrecke
bildet.

Wesentlich für den Ablauf des Regelvorganges ist der Grad der Verstärkung, den die im Kreise umlaufende Erregung erfährt; dieser bestimmt, ob der Sollwert aperiodisch gedämpft oder überschwingend erreicht wird oder, wenn das System instabil ist, der Vorgang in immer größere Schwingungen gerät.

Die Zeit, welche vom Auftreten einer Störung bis zum Beginn ihrer Korrektur durch den Regelkreis verstreicht, nennt man die Lauf- oder Totzeit des Regelkreises; daran schließt sich die Wegzeit an (WAGNER (32)), die vom Beginn der Korrektur bis zum Erreichen des Sollwertes dauert. Totzeit plus Wegzeit ergeben die Einstellzeit des Regelkreises, womit der Zeitraum zwischen dem Auftreten einer Störung bis zum Erreichen des Sollwertes gemeint ist.

Versucht man, den verschiedenen anatomischen und physiologischen Größen, die bei der Willkürkontraktion der menschlichen Skelettmuskulatur eine Rolle spielen, einen regeltechnischen Begriff zuzuordnen, so ergibt sich folgendes Bild der Regelung der Willkürbewegung (s. Abb. 2), um dessen Klarlegung sich WAGNER (31,32) ; v. HOLST u. MITTELSTAEDT (14) ; ELDRED, GRANIT u. MERTON (5) ; MERTON (20) ; KÜPFMÜLLER u. POKLEKOWSKI (17) ; VOSSIUS (25,27) ; VOSSIUS u. POKLEKOWSKI (28) ; VOSSIUS u. CHOUDHRY (29), siehe auch BURCKHARDT (3) und andere bemüht haben.

Nach einem im ZNS gebildeten Erregungsmuster, das gemäß den gespeicherten Erfahrungen aus früheren ähnlichen Erlebnissen und den von den Augen gemeldeten Eindrücken über die jetzt zu bewältigende Situation entsteht, erhält die Muskulatur eine willkürliche Innervation (Führungsgröße an den Regelkreis), die sich an der Regelstrecke (Muskulatur)



$x_1; x_2$ = Regelgröße
 y = Stellgröße
 z = Störgröße

Abb. 2

Blockschaltbild des "inneren" Regelkreises.

auswirken soll. Es kann nun aber eine Außenkraft, die die Störgröße z darstellt, z. B. das Gewicht eines zu bewegenden Gegenstandes, an der Regelstrecke angreifen, sodaß der gewünschte Sollwert nicht erreicht wird. Diese Abweichung des Istwertes vom Sollwert wird von den MS als Fühler gemessen, mit der Führungsgröße w verglichen, woraufhin der Regler eine der Abweichung entsprechend geänderte Stellgröße an das Stellglied gibt.

Die Gegenkoppelung der SS ist eine zentralnervöse, die der MS aber eine mechanische in der Peripherie. Die MS können bei Erschlaffung der sie umgebenden Muskulatur gedehnt werden, dadurch werden sie adäquat gereizt und erhöhen ihre afferente Impulsfrequenz, worauf der Muskel mit einer Kontraktion antwortet; durch diese Kontraktion der die MS umgebenden Muskelfasern werden die MS entdehnt und erreichen ihren Ruhezustand, in dem sie keine afferenten Impulse aussenden.

Es ist eine unbestrittene Tatsache, daß die MS und SS den Ablauf der willkürlichen Bewegung kontrollieren, indem sie die Dehnung, also die Längen- oder Wegänderung, und die Spannung, die mit der aufgewandten Kraft gleichbedeutend ist, rückmelden.

Uns erschien es von Interesse zu untersuchen, ob die Messung von Weg und Kraft immer gleichzeitig erfolgt oder ob nur eine Größe gemessen und die andere mitverstellt wird und ob beide Größen gleich genau gemessen werden. Über die Messung des Weges liegen schon Untersuchungen vor (MAYNE (19); KÜPFMÜLLER u. POKLEKOWSKI (17); VOSSIUS (25,27); VOSSIUS u. CHOUDHRY (29); WAGNER (32) und andere), während über die Auswertung der Kraft bei der Willkürbewegung nur eine,

in der Darstellung des Problems wenig ergiebige Arbeit kürzlich von JANZING, KOBOR u. WAGNER (15) erschienen ist.

Um einen Einblick in die Arbeitsweise eines Regelkreises zu erhalten, kann man das Führungsverhalten und das Störverhalten untersuchen. Das Führungsverhalten beobachtet man, während das System eine bestimmte Leistung zu vollbringen hat, in deren Ablauf keine unbeabsichtigten Störungen eingreifen. Zur Untersuchung beider Verhalten kann man mit einer sprung- und/oder sinusförmigen Größe das in Ruhe befindliche System erregen. Aus der Antwort auf diese Erregung des Regelkreises kann man auf seine Eigenschaften schließen, ohne dabei genauere Kenntnisse über die einzelnen Bauglieder haben zu müssen.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verhalten des Systems bei sprungförmiger Verstellung der Führungsgröße und der Störgröße, also die Übergangsfunktion des Regelkreises, untersucht.

M e t h o d i k .

Bei unseren Versuchen wirkte sich die Kraft an einem Stahlhebel aus, wurde also bei dem willkürlichen Krafteinsatz an seinem elastischen Widerstand erzeugt. Sollte die Versuchsperson (Vp) einer von außen vorgegebenen Kraft das Gleichgewicht halten, konnte der Hebel hierfür drehbar gelagert werden. Die vorgegebene Kraft griff dann an der anderen Seite des Hebelarmes an. Die Kraftregistrierung wurde mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) vorgenommen; dieses Prinzip eignet sich besonders für dynamische und wegfreie Kraftmessungen. Der Versuchsaufbau (s. Abb. 3 und 4) bestand aus einem Vierkantstahlrohr von 750 x 50 x 30 mm, an dem oben ein Handgriff aus Duraluminium angeschraubt war; der Hebel war mittels einer Stahlachse in Gleitlagern an zwei senkrecht stehenden Seitenhalterungen aus Winkelstahl aufgehängt. Die Seitenhalterungen waren rechtwinklig mit zwei U-Schienen verbunden, die auf eine Holzbohle aufgeschraubt waren. Auf dem Hebel waren in der Mitte zwischen Achse und Handgriff zwei DMS aufgeklebt, an der Seite des Hebels waren zwei weitere DMS zur Temperatorkompensation angebracht. Die DMS wurden von einem Trägerfrequenzmeßverstärker der Fa. Hottinger gespeist; die Registrierung erfolgte auf einem Düsendirektschreiber ("Cardirex" der Fa. Siemens); Papiervorschub 100 oder 200 mm/sec. Die Vp saß auf einem hölzernen Schemel und lehnte sich mit dem Rücken gegen ein senkrecht stehendes Holzbrett; dadurch hatte der Körper ein Widerlager, und die Kraft, um gegen den Hebel zu drücken, konnte nur von der Armmuskulatur eingebracht werden, das Gewicht des Körpers konnte nicht einge-

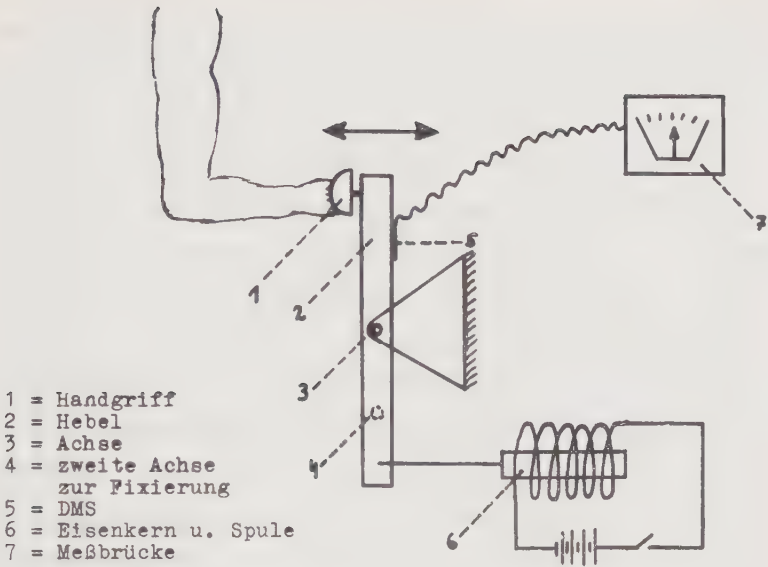


Abb. 3

Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues.

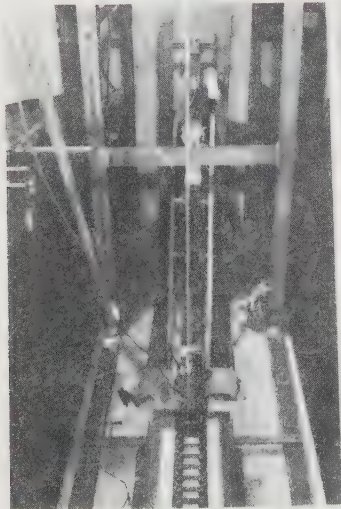


Abb. 4

Teilansicht des
Versuchsaufbaues.

setzt werden. Vor jedem Versuch wurde die Kraftregistrierung mit geeichten Gewichtsteinen bei festgestelltem Hebel überprüft.

Bei den Versuchen über die isometrische Kontraktion wurde der Hebel mittels einer zweiten, tiefer gelegenen Achse festgestellt. Es erfolgte somit eine Untersuchung der reinen Kraft ohne Wegkomponente, denn der durch die Materialverbiegung bedingte Weg von 1,5 mm bei einer Belastung mit 20 kg ist vernachlässigbar klein. - Zur Untersuchung der zusätzlich belasteten Bewegung, wenn also gleichzeitig eine Kraft aufzuwenden und ein Weg zurückzulegen ist, wurde unten am Hebel eine Stahlzugfeder befestigt; die Vp hatte den Hebel gegen den steigenden Druck der Feder senkrecht zu stellen. - Die Experimente über die unbelastete Bewegung wurden an der beschriebenen Anordnung ausgeführt, indem die Vp den leicht um seine Achse drehbaren Hebel senkrecht zu stellen hatte. Bei diesen Versuchen wurde, abgesehen von der Kraft zur Verstellung von Hebel und Arm, ein reiner Weg zurückgelegt. Die Länge des Weges war genau so groß wie bei den kombinierten Kraft - Weg - Versuchen.

Die Versuche über das Störverhalten bei gleichzeitiger Verstellung von Kraft und Weg wurden auf drei Arten ausgeführt:

1. Am unteren Ende des Hebels wurde über ein reibungsarmes Gestänge mit einem Ausgleichsglied der Weicheisenkern einer großen Spule angebracht. Es wurde der sprungförmige Kraftabfall beim Ausschalten der Spule ausgewertet; beim Einschalten erfolgte der Kraftanstieg durch die Induktion der Spule verzögert.

2. Am unteren Ende des Hebels wurde eine Stahlzugfeder befestigt; diese Verbindung wurde von der Vp unbemerkt durchschnitten, wodurch die Kraft sprungförmig abfiel.

3. Der Zug der am Hebel befestigten Stahlzugfeder wurde durch eine in entgegengesetzter Richtung gespannte Schnur aufgehoben. Das Durchschneiden dieser Schnur, das unbemerkt von der Vp erfolgte, bewirkte einen sprungförmigen Kraftanstieg.

Für die statistische Auswertung wurden die Formeln und Tabellen von GRAF u. HENNING (7) verwendet.

Versuche und ihre Ergebnisse.

I. Versuche über das Führungsverhalten bei wegfreier Kontraktion.

Die drei Versuchspersonen (Vpn) hatten die Aufgabe, durch möglichst schnelle Kontraktion ihrer Armmuskulatur einen bestimmten Kraftwert, der entweder 2,5 ; 5 ; 10 oder 20 kg betrug, zu drücken. Jede Versuchsreihe bestand aus 20 Einzelversuchen, von denen die ersten fünf unter Kontrolle auf einem elektrischen Anzeiginstrument, die nächsten zehn bei geschlossenen Augen und die letzten fünf wieder unter Kontrolle durch den Blick auf das Instrument ausgeführt wurden. Es wurden bei jeder Vp von jedem geforderten Gewicht fünf Versuchsreihen registriert. Die Vpn wurden zu Beginn einer jeden Versuchsreihe aufgefordert, mit einem möglichst schnellen Kraftanstieg den Sollwert zu erreichen. Die zeitliche Abfolge innerhalb einer Reihe war dann in das Belieben der Vpn gestellt.

Von den Versuchen bei geschlossenen Augen wurden ausgewertet: Die Geschwindigkeit des Kraftanstieges, die Größe des erreichten Dauerwertes und seine prozentuale Abweichung vom Sollwert und die Wegzeit, die benötigt wurde, um den Dauerwert zu erreichen. Die Versuche, bei denen sich die Vpn auf dem Anzeiginstrument kontrollieren konnten, wurden nur zum Vergleich innerhalb dieser Versuchsserie, nicht aber zum Vergleich mit anderen Versuchserien herangezogen. Die Kraftanstiege pro Sekunde wurden nach dem wahrhaft erreichten Dauerwert normiert, um einen Vergleich zwischen den einzelnen Gewichten zu ermöglichen (gr/sec : Dauerwert in gr).

In der folgenden Tabelle sind die normierten Kraftanstiege bei den verschiedenen Sollgewichten für die einzelnen Versuchspersonen eingetragen:

	2,5	5	10	20	kg
Vp.: Al	33,1	33,6	41,5	45,0	
Kr	38,0	47,4	61,7	58,8	
Vo	21,2	22,5	25,7	29,7	

Tab. 1

Mittelwerte der normierten Kraftanstiege bei der isometrischen Kontraktion.
 Angabe in sec^{-1} , da $\frac{\text{erreichte Kraft in gr} \cdot \text{sec}^{-1}}{\text{Sollkraft in gr}} = \text{normierter Kraftanstieg in sec}^{-1}$.

Es gibt zwischen den drei Vpn deutliche individuelle Unterschiede in ihren Möglichkeiten, einen bestimmten Kraftwert möglichst schnell zu drücken. Aber alle Vpn zeigen die Tendenz, um so schneller zu drücken, je größer das geforderte Gewicht ist. - Untersucht man die normierten Kraftanstiege der einzelnen Vpn, aufgeteilt nach der Reihenfolge innerhalb der Versuchsreihen, so sieht man, daß unter Kontrolle durch den Blick auf das Instrument die Werte während des 1. und 2. Versuches ansteigen, eine ziemlich gleichmäßige Höhe erreichen, um , sobald die Augen geschlossen werden, auf eine Ebene abzufallen, die unter der des ersten Versuches liegt. Die Vpn Vo. und Kr. halten sich etwa auf der niederen Ebene, während sich bei der Vp Al. ein dauerndes Langsamerwerden des Kraftanstieges zeigt. Bei allen drei Vpn wird die Geschwindigkeit des Kraftanstieges wieder größer, sobald sich die Vpn auf dem Anzeigeelement optisch kontrollieren können. (S. Abb. 5).

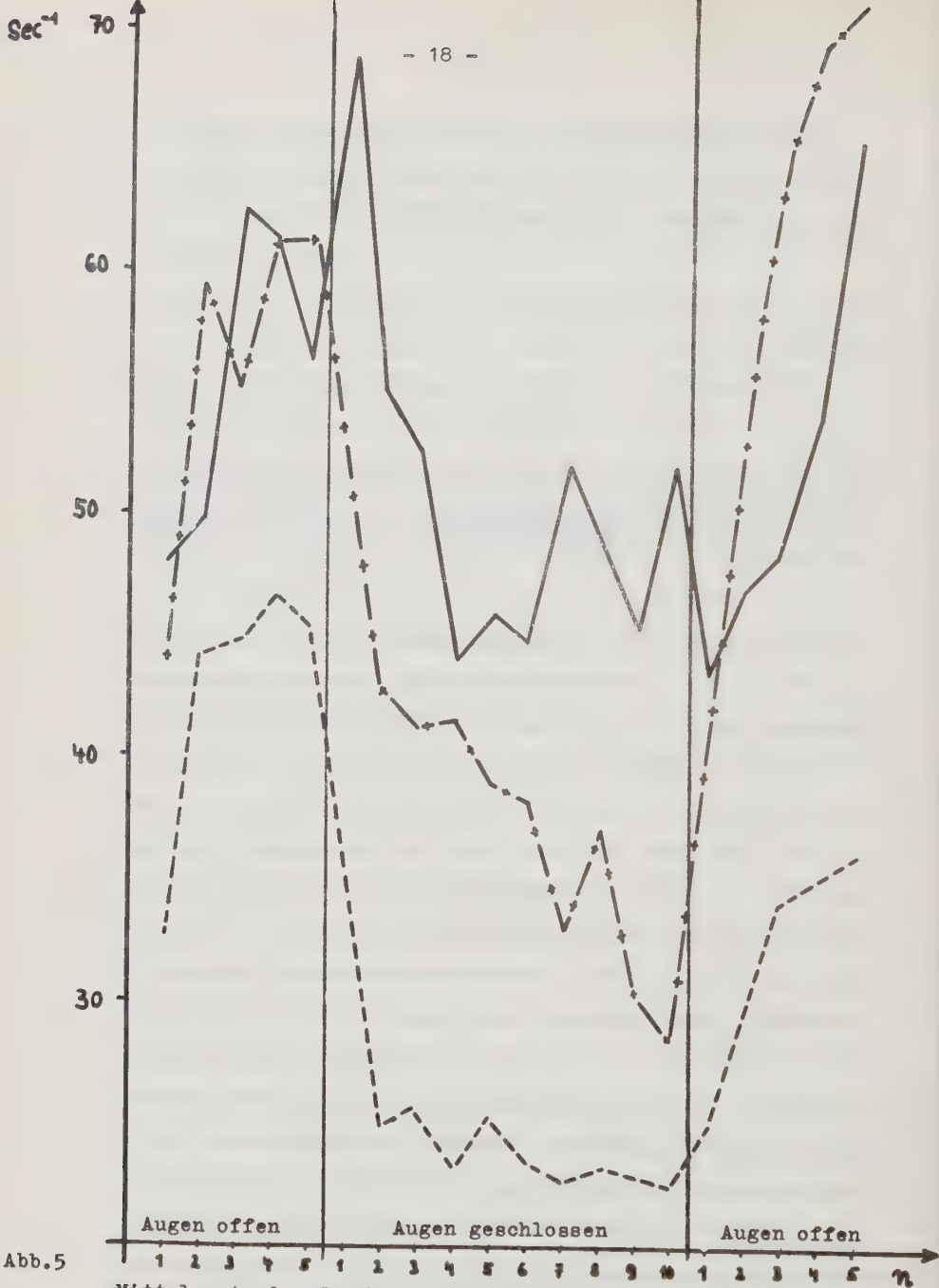


Abb.5

Mittelwerte der Geschwindigkeiten der normierten Kraftanstiege über alle Sollgewichte bei der isometrischen Kontraktion, aufgeteilt nach der Reihenfolge innerhalb der Versuchserien. Angabe in sec^{-1} (Erklärung der Dimension sec^{-1} s.Tab.1)

$-\times-\times-$ Vp Al.

$—$ Vp Kr.

$-----$ Vp Vo.

Betrachtet man die Häufigkeit des Vorkommens der verschiedenen Werte des normierten Kraftanstieges bei den drei Vpn über alle Versuchsreihen, ohne dabei die Gewichte zu berücksichtigen, so zeigt sich eine deutliche Häufung (s. Tab. 2) :

Vp.:	Al.	20 - 35
	Kr.	30 - 40
	Vo.	15 - 35

Tab. 2

Häufung der Mittelwerte des normierten Kraftanstieges ohne Berücksichtigung der Gewichte. Angabe in sec^{-1} .

Bei ausgedehnten Vorversuchen, bei denen die Vpn nicht aufgefordert worden waren, möglichst schnell den verlangten Wert zu drücken, lagen die Werte bei allen Vpn sehr gehäuft zwischen 2,5 und 4 sec^{-1} ; die Kraftanstiege waren wesentlich langsamer, ihre Streuung über andere Werte gering.

Betrachtet man die Mittelwerte der Wegzeiten, also der Zeit, die vom Beginn der Bewegung bis zum Erreichen eines Dauerwertes verstreicht, so ergibt sich, daß sie sich etwa entsprechend den Geschwindigkeiten des Kraftanstieges verhalten, d. h. je schneller der Kraftanstieg ist, desto kürzer ist die Wegzeit.

	2,5	5	10	20	kg
Vp.:					
Al.	262	280	318	318	
Kr.	244	248	255	191	
Vo.	326	369	322	284	

Tabelle 3.

Mittelwerte der Wegzeiten bei den einzelnen Sollgewichten. Angabe in Millisekunden.

Bei der Vp Kr. und bei der Vp Vo. wird die Wegzeit von 10 zu 20 kg deutlich kürzer, bei der Vp Al. bleibt sie gleich groß.

Vergleicht man die Mittelwerte der Wegzeiten innerhalb der Versuchsreihen (s. Abb. 6), so sieht man, daß alle Vp beim 1. Versuch eine lange Wegzeit haben, die sich beim 2. Versuch um $1/4$ bis $1/5$ verkürzt, um sich auf diese Ebene einzustellen. Nach Schließen der Augen brauchen die Vp Al. und Vo. wieder fast so lange wie beim 1. Versuch, während die Vp Kr. die kurzen Wegzeiten beibehält. Ein Vergleich der Wegzeit mit der Geschwindigkeit des Kraftanstieges bei Beachtung der Reihenfolge innerhalb der Versuchsreihen zeigt auch das schon oben erwähnte Verhalten : Wer schnelle Kraftanstiege aufbringt hat meist kurze Wegzeiten und umgekehrt.

Die Abweichungen des wahrhaft erreichten Dauerwertes vom geforderten Sollwert, ausgedrückt in Prozent, und die dazugehörige Streuung um den Mittelwert ergeben sich aus der folgenden Tabelle :

	2,5	5	10	20	kg
Vp.: Al.	$\bar{x} = +19,94$	-5,7	-6,2	-9,25	
	$s = 0,1147$	0,0725	0,0590	0,0629	
Kr.	+7,2	-0,85	-7,55	-5,9	
	0,0818	0,0814	0,0717	0,0638	
Vo.	+11,2	+9,27	+7,3	+17,25	
	0,0953	0,1236	0,0988	0,0914	

Tabelle 4.

In der oberen Zeile sind jeweils die Mittelwerte der prozentualen Dauerabweichung ($\bar{x}$), in der unteren Zeile die Streuungen um den Mittelwert angegeben (s).

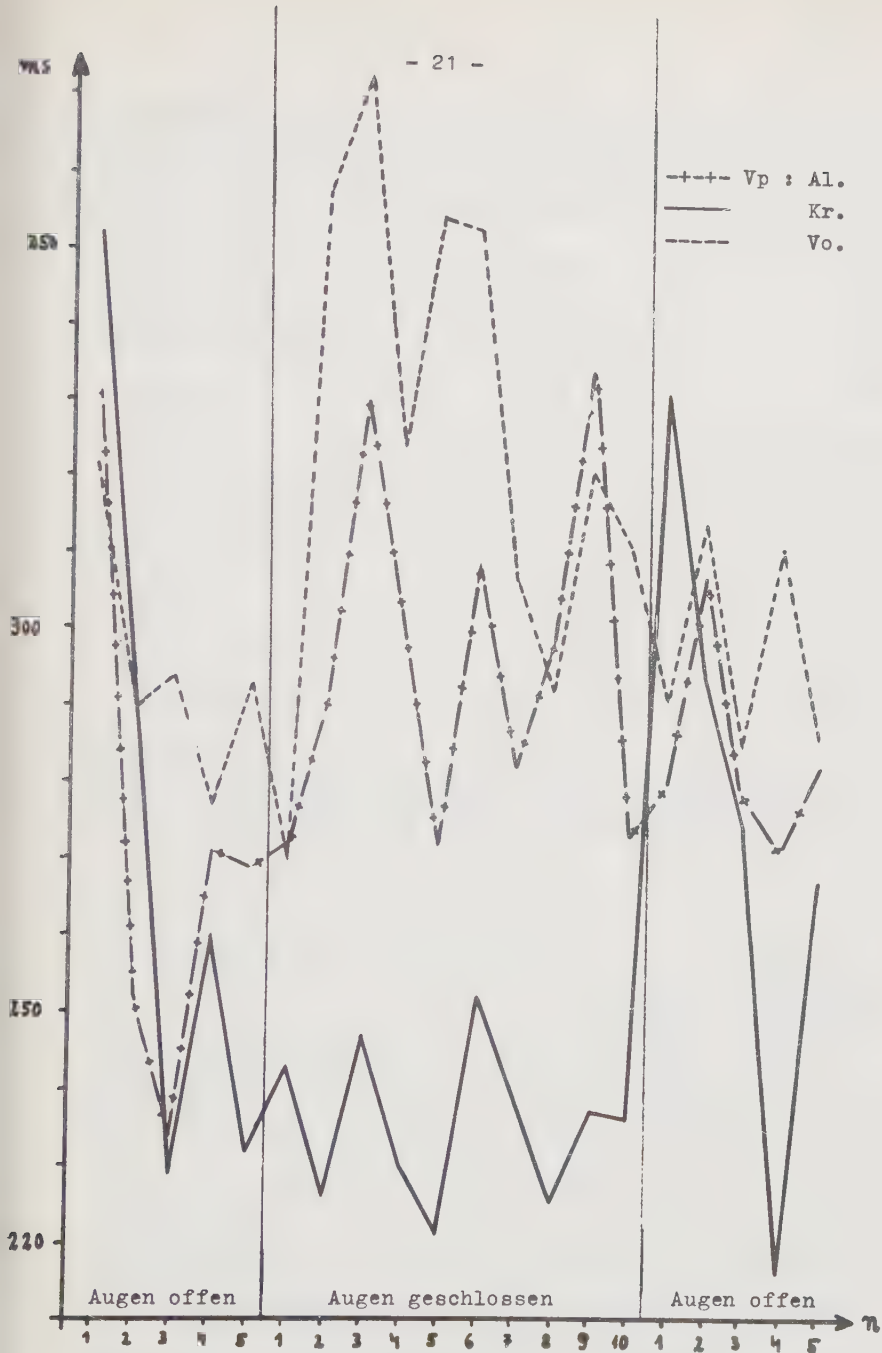


Abb. 6
 Mittelwerte der Wegzeiten bei der isometrischen Kontraktion,
 aufgeteilt nach der Reihenfolge innerhalb der Versuchsreihen.

Bei der Betrachtung der prozentualen Dauerabweichung der Kraft ist keine deutliche Tendenz festzustellen, weder bei einem Vergleich der drei Vpn noch der verschiedenen Gewichte, die gedrückt wurden. - Untersucht man die Mittelwerte der Dauerabweichung nach der Reihenfolge in den Versuchsreihen, so sieht man, daß die Vp Vo. bei + 9,7 % beginnt, bis zum dritten Versuch auf + 4,6 % abfällt, um dann mit durchgehend positiver Tendenz + 16,7 % zu erreichen. Die Vp Al. beginnt mit - 1,2 % und fällt bis zum dritten Versuch auf - 6,25 %, um dann langsam auf - 1,3 % zu steigen. Die Vp Kr. weicht beim ersten Versuch nach + 2,6 % ab, sinkt dann auf - 1,97 % und erreicht mit geringen Schwankungen - 1,57 %. Nur die Vp Vo. wandert also deutlich ins Positive aus, während die beiden andren Vpn nicht mit einer eindeutigen Tendenz vom Sollwert abweichen. Die großen Unterschiede der prozentualen Abweichung im Gesamtverhalten und nach der Reihenfolge erklären sich daraus, daß sich bei der Mittelwertsberechnung die positiven und negativen Abweichungen z. T. aufheben.

II. Versuche über das Führungsverhalten bei der zusätzlich belasteten Bewegung.

Bei diesen Versuchen hatten die Vpn den Hebel gegen eine steigende Federkraft senkrecht zu stellen, wobei der Hebel einen Weg von 200 mm zurücklegte; in senkrechter Stellung betrug der Druck des Hebels auf die Hand 10 bzw. 15 kg. Die Vpn übten vor jedem Versuch so lange, bis sie selbst meinten, auf den verlangten Wert gut eingestellt zu sein. Dann wurden 10 Versuche, bei denen die Vpn die Augen geschlossen hielten, auf einer in mm eingeteilten Skala registriert. Es wurden

mit jedem der beiden Gewichte bei jeder Vp je 10 Versuchsreihen zu 10 Einzelversuchen ausgeführt. Zur Auswertung wurde der registrierte Weg einmal in die prozentuale Abweichung von der Sollkraft und zum anderen in die prozentuale Abweichung vom verlangten Weg umgerechnet, es wurde also eine Größe registriert und die andere daraus berechnet.

	KRAFT		WEG	
	10	15	10	15 kg
Vp.: Al. $\bar{x}$ =	-2,26	-1,86	-3,20	-3,91
s =	0,0317	0,0267	0,0445	0,0562
Kr.	-1,73	-0,40	-3,13	-1,04
	0,0305	0,0173	0,0549	0,0448
Vo	+1,05	+0,82	+1,89	+2,17
	0,0182	0,0230	0,0324	0,0637

Tabelle 5.

In der oberen Zeile sind jeweils die Mittelwerte der prozentualen Dauerabweichung ($\bar{x}$), in der unteren Zeile die Streuungen um den Mittelwert (s) eingetragen.

Betrachtet man die Mittelwerte nach der Reihenfolge, wie sie in den Versuchsreihen vorkommen, so gilt für die Kraft, daß die Vp Vo. bei beiden Gewichten während der ersten Hälfte stetig positiv abweicht, bis etwa 1,5 %, um sich dann auf diesem Niveau der Abweichung zu halten. Die Vp Al. zeigt ein etwa umgekehrtes Verhalten; sie wandert ins Negative aus, bei 10 wie 15 kg bis etwa -3 %, erreicht aber keinen gleichbleibenden Wert. Die Vp Kr. zeigt kein so eindeutiges Verhalten; ihre Werte der Abweichung liegen mit kleineren Schwankungen bei 10 kg zwischen -1,2 % und -2,2 %; bei 15 kg beträgt die Abweichung anfangs -1,5 % und steigt im

Verlauf der Versuchsreihen auf $+0,5\%$ an. - Da nur der Weg gemessen und die Kraft daraus berechnet wurde, liegen die Werte für die prozentuale Wegabweichung entsprechend, doch sind die Abweichungen größer.

III. Versuche über das Führungsverhalten bei alleiniger Zurücklegung eines Weges.

Auch bei diesen Versuchen wurde von den Vpn verlangt, die Bewegung möglichst schnell auszuführen. Sie hatten den Hebel so um seine Achse zu drehen, daß er am Ende der Bewegung senkrecht stand, wobei von der Hand ein Weg von 200 mm (wie bei den unter II beschriebenen Versuchen) zurückgelegt wurde. Die Vpn hatten vor jedem Versuch Gelegenheit sich zu üben. Dann wurden sofort 10 Versuche registriert, bei denen die Vpn die Augen geschlossen hielten. Es wurden von jeder Vp 10 Versuchsreihen zu 10 Einzelversuchen registriert und ausgewertet.

Es wurden bei diesen Versuchen die Mittelwerte der prozentualen Dauerabweichung und die Streuungen um den Mittelwert ausgerechnet (s. Tab. 6) .

	Mittelwert	Streuung
Vp.: Al.	+ 0,48	0,0275
Kr.	- 3,36	0,0360
Vo.	- 0,42	0,0326

Tabelle 6.

Mittelwerte der prozentualen Dauerabweichung des Weges und Streuungen um den Mittelwert.

Betrachtet man auch hier wieder die prozentuale Abweichung

nach der Reihenfolge innerhalb der Versuchsreihe, so zeigt die Vp Vo. eine leicht fallende Tendenz von + 0,8 % nach - 1,3 %. Bei der Vp Al. steigen die Werte von + 0,28 % auf + 1,64 % langsam an; bei der Vp Kr. fallen sie von - 3,15 % auf - 4,25 %.

Es wurden zu diesen Versuchen über die alleinige Zurücklegung eines Weges noch Kontrollversuche an einer anderen Versuchsanordnung, bei der die Bewegung in einer seitlichen Auslenkung des Armes bestand, vorgenommen. Dabei wurde der von VOSSIUS und CHOUDHRY (28) beschriebene Versuchsaufbau benutzt. Auch diesmal war ein Weg von 200 mm zurückzulegen. Die Versuche wurden mit zwei Vpn (Vo. und Kr.) ausgeführt. Nachdem die Vpn vor jeder Versuchsreihe geübt hatten, wurden 30 Versuche bei geschlossenen Augen registriert. Es wurden bei jeder Vp 10 Versuchsreihen durchgeführt. In der folgenden Tabelle sind die Dauerabweichungen des Weges eingetragen:

	erste 10	zweite 10	dritte 10	erste 3	letzte 3
Vp: Kr.	- 0,1	+ 2,1	+ 1,7	+ 0,6	+ 1,8
Vo.	- 1,8	- 3,3	- 4,8	- 3,0	- 3,7

Tabelle 7.

Die 30 Einzelversuche einer Versuchsreihe wurden in drei Zehnergruppen eingeteilt, von denen die Mittelwerte der prozentualen Dauerabweichung in den drei ersten Spalten eingetragen sind. Außerdem wurden die Mittelwerte der 3 ersten Versuche einer jeden Versuchsreihe und der 3 letzten Versuche ermittelt.

IV. Versuche über das Störverhalten bei sprunghörmiger

Kraftänderung.

Bei diesen Experimenten erfolgte einmal die Aufbringung

der Störkraft durch eine elektrische Spule, wie es oben ausführlich beschrieben worden ist. Es wurde vom Versuchsleiter darauf geachtet, daß das Ein- und Ausschalten über einen lautlosen Quecksilber-Schalter in unregelmäßigen Zeitabständen erfolgte, damit die Vpn unvorbereitet von dem Kraftstoß und seinem Nachlassen überrascht wurden. Die Versuche wurden mit zwei Vpn (Al. und Kr.) durchgeführt. Die auf den Arm der Vp drückende Kraft des Hebels betrug zwischen 2,5 und 10 kg, eingeteilt in Abstände von 1 kg. Es wurden insgesamt über 400 Einzelversuche beider Vpn ausgewertet.

Es wurden Kontrollversuche ausgeführt, bei denen eine Verbindung zwischen der gespannten Stahlzugfeder und dem Hebel von der Vp unbemerkt durchschnitten wurde.

Aus diesen Versuchen sollte die Laufzeit des Regelkreises ermittelt werden, also die Zeit, die vom Beginn einer Kraftänderung des Hebels bis zur beginnenden Gegenaktion der Hand verstreicht. Bei den Versuchen mit der Feder war die Auswertung schwierig, weil hier keine Masse vorhanden war, an der der Kraftabfall wirksam werden konnte, wie es bei den Versuchen mit der Spule durch den am Hebel befestigten großen Eisenkern der Fall war.

Unter Berücksichtigung unserer experimentellen Bedingungen ermittelten wir den Mittelwert der Laufzeit zu 15 - 20 Millisekunden.

D i s k u s s i o n d e r
V e r s u c h s e r g e b n i s s e .

Aus den Untersuchungen von MAYNE (19) ; WAGNER (32) ; KÜPFMÜLLER (16) ; KÜPFMÜLLER und POKLEKOWSKI (17) ; VOSSIUS (25,27) ; VOSSIUS und POKLEKOWSKI (28) ; VOSSIUS und CHOUDH-
RY (29) ; VOSSIUS und WAGNER (30) und anderen geht hervor,
daß an der menschlichen Willkürbewegung zwei Regelkreise
beteiligt sind. Es handelt sich um einen "äußeren" , dem das
Auge als Fühler dient, und um einen "inneren" , dessen Fühler
die sensiblen Organe im Muskel sind und dessen Regler wahr-
scheinlich im Rückenmark liegt. In den genannten Arbeiten
wird die Willkür b e w e g u n g untersucht, d. h. die
Kontraktionsform der Muskulatur, bei der ein Weg zurückgelegt
wird. Auf die Kraft, die dabei aufgebracht werden muß, wurde
in den Veröffentlichungen nicht näher eingegangen, sie wurde
als eine unvermeidbare Nebenerscheinung, ohne die keine Kon-
traktion möglich ist, angesehen. Da in der Skelettmuskulatur
neben den wegregistrierenden Organen (Muskelspindeln) auch
spannungsempfindliche Elemente (Sehnenspindeln) vorhanden
sind, untersuchten wir die Bedeutung der letzteren für die
menschliche Willkürbewegung.

Um das alleinige Kraftverhalten des inneren Regelkreises
zu untersuchen, ließen wir die Vpn isometrische, also weg-
freie Kontraktionen ihrer Armmuskulatur bei geschlossenen
Augen durchführen und registrierten dabei den Kraftverlauf.
Bei einer Betrachtung der oben angegebenen Mittelwerte der
prozentualen Dauerabweichung vom geforderten Sollwert (s.
Tab. 4) erkennt man, daß das System recht ungenau arbeitet.

Mit einer Ausnahme liegen die Werte bei 6 - 20 % , wobei diese Abweichungen sowohl positiv als auch negativ waren.

Die Ungenauigkeit der Krafteinstellung zeigt sich auch deutlich daran, daß in einer größeren Anzahl unserer Kurven überhaupt kein konstanter Wert erreicht wurde, sondern die Kraft stetig abnahm (s. Abb. 7). Diese Erscheinung ist sicher nicht auf eine mangelnde Konzentration der Vpn, auch nicht auf ihre objektive Ermüdung zurückzuführen, denn die Kraft sank auch bei einem Sollgewicht von 2,5 kg ab. Da an einem Tage bei einer Vp höchstens drei Versuchsserien registriert wurden, zwischen denen längere Pausen lagen, konnte bei den drei männlichen Vpn, die in einem guten körperlichen Allgemeinzustand waren, keine Erschöpfung vorliegen. Wahrscheinlich kann der Sollwert von den Vpn nicht so gut in der "Erinnerung" behalten werden. Vielleicht liegt auch eine Adaptation der SS vor; doch erscheint uns diese Annahme unwahrscheinlich. War bei einer Kurve kein Dauerwert eingestellt worden, sondern sank die Kraft stetig ab, so zeigte sich im allgemeinen in den folgenden Kurven einer Versuchsreihe dasselbe Verhalten, oder es wurde ein konstanter Wert eingestellt, dessen prozentuale Abweichung weit größer als sonst war. Dies spricht auch für eine mangelhafte "Erinnerung" an den Sollwert.

Nachdem wir die große Dauerabweichung bei der Kraft ermittelt hatten, suchten wir einen Vergleich mit dem System bei alleiniger Zurücklegung eines Weges. Diese Wegversuche entsprechen nicht der an isolierten Muskelpräparaten gefundenen, isotonischen Kontraktion. Denn eine solche ist am unverletzten Objekt nie exakt auszuführen, weil immer Kräfte

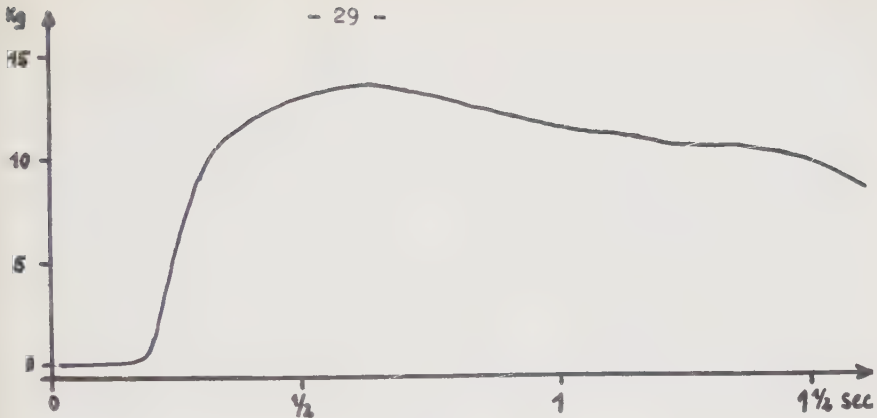


Abb. 7

Originalkurve des Kraftverlaufes bei der isometrischen Kontraktion. Sollkraft 10 kg = 40 mm.
Zeitschreibung : 100 mm / sec
Die Vp hält die Augen geschlossen.

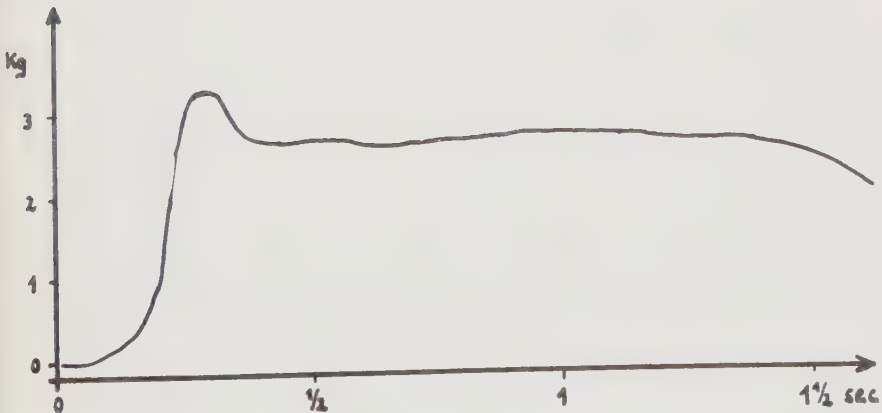


Abb. 8

Originalkurve des Kraftverlaufes bei der isometrischen Kontraktion. Sollkraft 2,5 kg = 40 mm.
Zeitschreibung : 100 mm / sec
Die Vp hält die Augen geschlossen.

aufgewandt werden müssen, um die Gliedmaßen zu bewegen. Bei schnellen Bewegungen können diese Kräfte außerordentlich groß sein. So zeigte z. B. VOSSIUS (26) am Auge, daß für eine maximale Beschleunigung des Bulbus die gesamte Maximalkraft der Augenmuskeln einer Seite notwendig ist. - Wir führten die Wegversuche an der gleichen Versuchsanordnung wie die Kraftversuche aus. Auch hier erfolgte die Bewegung in Richtung nach vorne, vom Körper der Vp weg. Bei diesen Experimenten betrug die prozentuale Abweichung des Dauerwertes vom Sollwert 0,4 bis 3,4 %. Sie ist also wesentlich kleiner als bei den reinen Kraftversuchen.

Als dritte experimentelle Möglichkeit bot sich uns die Untersuchung der Bewegung bei gleichzeitiger zusätzlicher Belastung (auxotonische Bewegung) an. Hiermit sollte geklärt werden, welche Meßgröße die Prävalenz hat, die Kraft oder der Weg. Diese Bewegung unterscheidet sich von der isometrischen Kontraktion, da jetzt ein Weg zurückzulegen ist, der genau so groß ist wie bei den alleinigen Wegversuchen. Der Unterschied zu den reinen Wegversuchen bestand darin, daß bei letzteren die nach außen abgegebene Kraft in der Endphase der Bewegung auf Null absinkt. Man kann die reinen Wegversuche also als eine quasi-isotonische Bewegung bezeichnen, denn im Gegensatz zu der theoretisch isotonischen Bewegung ist die Kraft nicht während der ganzen Bewegung gleich, sondern zu Beginn groß und am Ende der Bewegung klein; dagegen erreicht bei der belasteten Bewegung die Kraft am Ende ihr Maximum. Die Werte der prozentualer Abweichung der Kraft liegen zwischen 0,5 und 2 %, die des Weges zwischen 1 und 4 % (s. Tab. 5). Die Kraft wird also wesentlich genauer

eingestellt, wenn gleichzeitig ein Weg zurückgelegt wird, als bei der isometrischen Kontraktion. Die Wegeinstellung hingegen ist unter zusätzlicher Belastung ungenauer als bei der unbelasteten Bewegung. In irgendeiner Weise macht sich hier die zusätzliche Rückmeldung durch die Kraftrezeptoren störend bemerkbar. Die Afferenzen der MS werden irgendwie durch die Afferenzen der ungenauer arbeitenden SS im Rückenmark moduliert. Es ergibt sich daraus eine ungenauere Efferenz zu den Muskelfasern.

Am deutlichsten wird die Genauigkeit, mit der bei den drei verschiedenen Versuchsserien die Einstellungen erfolgen, durch einen statistischen Vergleich der Streuungen um den Mittelwert. Die Streuungen geben in absoluten Zahlen an, wie weit vom Mittelwert entfernt die jeweiligen Einzelwerte liegen. Da sich keine Tendenz der Abweichungen ins Positive oder Negative zeigt, sondern die Werte innerhalb der Versuchsserien nach beiden Richtungen im Mittel um etwa den gleichen Betrag abweichen oder in Form von " Tagesschwankungen " einmal nur ins Positive und ein anderes Mal nur ins Negative auswandern, kann ein statistischer Vergleich der Mittelwerte nicht so viel zeigen wie ein Vergleich der Streuungen um den Mittelwert, da sich bei der Mittelwertberechnung gegensinnige Werte ja aufheben.

In der folgenden Tabelle ist ein statistischer Vergleich der Streuungen um den Mittelwert zwischen der isometrischen und der auxotonischen Bewegung einerseits und zwischen der auxotonischen und der quasi-isotonischen Kontraktion andererseits durchgeführt:

	Al.	Kr.	Vo. (Vp)
<u>10 kg isometrisch</u> (Kraft)	++	++	++
<u>10 kg auxotonisch</u>			
<u>20 kg isometrisch</u> (Kraft)	++	++	++
<u>15 kg auxotonisch</u>			
<u>10 kg auxotonisch</u> (Weg)	++	++	++
<u>quasi-isotonisch</u>			
<u>15 kg auxotonisch</u> (Weg)	++	++	++
<u>quasi-isotonisch</u>			

Tabelle 8.

Statistischer Vergleich der Streuungen um den Mittelwert bei den drei verschiedenen Kontraktionsformen. Die Versuchsart, bei der die größere Streuungsbreite auftrat, steht immer über dem Bruchstrich, d. h. die im Nenner des Bruches stehende Versuchsart weist immer die signifikant kleinere Streuung gegenüber der ersteren auf.
 Zeichenerklärung : ++ Sicherheit der Unterschiede beträgt mehr als 99,9 %.

Aus diesem Vergleich der Streuungen geht eindeutig hervor, daß ein Gefälle zwischen den verschiedenen Kontraktionsformen besteht : Die Streuungen bei der isometrischen Kontraktion sind signifikant größer als bei der auxotonischen und bei letzterer wieder mit einer statistischen Sicherheit von mehr als 99,9 % größer als bei der quasi-isotonischen Bewegung. Umgekehrt ausgedrückt, sind die Streuungen um den Mittelwert bei der unbelasteten Bewegung kleiner als bei der zusätzlich belasteten und bei dieser mit Sicherheit kleiner als bei der isometrischen Muskelkontraktion. Damit zeigt sich, daß ein Sollwert einwandfrei genauer eingestellt werden kann, bei dem die MS als Meßwerk dienen, als ein solcher bei dem die SS als Rezeptoren verwendet werden.

Nachdem wir die Genauigkeitsgrenzen, mit der die Kraft eingestellt wird, umrissen haben, müssen wir uns fragen,

welche Aufgaben die kraftempfindlichen Elemente bei der Muskelkontraktion haben und ob sie diesen gerecht werden können, obwohl sie nach unseren Ergebnissen so ungenau einstellen.

Die wegeempfindlichen MS liegen in einer Parallelschaltung mit den Muskelfasern. Sie werden durch Zug am erschlafften Muskel gereizt und nehmen während der Kontraktion ihren entdehnten Ruhezustand ein. Die spannungsregistrierenden SS hingegen befinden sich in einer Hintereinanderschaltung mit dem Muskel und werden durch jeden Zug an der Sehne erregt. Diese Erregung kann einmal durch einen am Muskel von außen angreifenden Zug erfolgen, aber auch, was das Wichtigere ist, durch die Kontraktion des Muskels selbst. Die SS haben die Aufgabe, den Muskel vor einer übermäßigen Kraftentfaltung und damit vor einer Schädigung seiner selbst zu bewahren. Nach Untersuchungen von ECCLES u. Mitarb. (4) haben die afferenten Fasern der SS keine direkten synaptischen Verbindungen mit den Vorderhornzellen des RM. Die Afferenzen der SS können keinen monosynaptischen myostatischen Reflex auslösen, dies bleibt allein den MS vorbehalten. Die afferenten Fasern der SS enden an Zwischenneuronen, die Verbindungen mit den Vorderhornzellen haben und somit die hemmenden Impulse den motorischen Zellen mitteilen. Da bei jeder Willkürbewegung durch die erzeugte Spannung auch die Golgi-Organen erregt werden, müßten diese verzögernd auf die Bewegung einwirken, wenn ihre Afferenz nicht im RM, von höheren Zentren aus gesteuert, unterdrückt würde. Damit verlören aber die SS ihre wesentliche Funktion, nämlich die Muskelkontraktion bei plötzlichen Störungen zu hemmen, damit der

Muskel oder die Sehne nicht zerreißt. Wir nehmen an, daß sich, um die Steuerung durch höhere Zentren und damit die Lähmung der SS - Tätigkeit auszuschalten, die fördernden Impulse der MS und die hemmenden der SS summieren, ehe sie an der Vorderhornzelle mit einem bestimmten Übersetzungsverhältnis multipliziert werden, daß also die hemmenden Impulse nicht einfach unterdrückt werden. Erhalten die MS über ihr eigenes efferentes γ -System eine große Vorspannung, so verringert sich der bremsende Einfluß der SS auf die Kraft und damit auf die Geschwindigkeit der Bewegung erheblich (VOS-SIUS (26)) .

Wir nehmen an, daß bei der Willkür b e w e g u n g die SS im wesentlichen die Aufgabe haben, eine übermäßige Spannungsentwicklung zu verhindern. Welche Aufgabe haben aber die SS bei der isometrischen Kontraktion, wenn wir einmal annehmen, sie hätten überhaupt eine? Ob das der Fall ist, soll weiter unten erörtert werden. Bei der Bewegung haben die SS die Aufgabe des "Bremsers" . bei der isometrischen Kontraktion haben sie die des "Lenkers" wahrzunehmen, denn die MS können bei der wegfreien Kontraktionsform diese Aufgabe nicht erfüllen. Bei der Mehrzahl der Kontraktionen, die die menschliche Skelettmuskulatur auszuführen hat, wird ein Weg zurückgelegt, wodurch die Einstellung recht genau erfolgt. Bei den wegfreien Kontraktionen wird die Kraft ungenauer eingeschätzt, was dazu führt, daß der Mensch dabei völlig unbewußt versucht, einen zusätzlichen Weg zurückzulegen. Hat er z. B. eine Stange in ein dafür genau gebohrtes Loch zu schieben und soll die Stange ein bestimmtes Stück herausragen, so schiebt er nicht einfach die Stange hinein, sondern

führt dabei eine schraubende Bewegung aus, verteilt also die Kraft auf eine möglichst große Strecke Weges. Je größer die geforderte Genauigkeit der Einstellung ist, desto kleiner wird die Steigung der schraubenden Bewegung, auf einen um so größeren Weg wird man die Kraft verteilen, je genauer man sie abzuschätzen sucht.

Aus den zu Beginn dieses Abschnittes angeführten Veröffentlichungen kann man entnehmen, daß für die Einstellung des Weges eine Regelung vorliegt. Für uns stellt sich die Frage, ob bei der isometrischen Kontraktion die Kraft geregelt wird oder ob vielleicht eine Steuerung vorliegt, bei der keine Rückmeldung durch die SS in einem geschlossenen Informationskreislauf erfolgt. Wenn wir die Ergebnisse, die für eine Regelung, und diejenigen, die für eine Steuerung sprechen, gegeneinander abwägen, so können wir keine sichere Entscheidung treffen, ob die Kraft geregelt oder gesteuert wird. Für eine Regelung spricht neben der physiologischen Schaltung der Afferenzen der allgemeine Kraftverlauf, in dem die Kurve etwas langsam ansteigend beginnt (s. Abb. 8). In sehr vielen Fällen wird eine überschießende Kraft aufgebracht, die erst nach einer längeren Zeit (200 - 350 ms) einen Dauerwert erreicht, die Endphase ist also recht schleppend. Die Regelung hat gegenüber der Steuerung den Vorteil, daß die Kraft bereits im Verlaufe der Bewegung reduziert werden kann. Schwierig ist beim Steuersystem das Zeitabschätzen. Es kann auch bei nicht maximaler Sollwertverstellung maximale Kraft eingesetzt werden, doch muß rechtzeitig die Gegenkraft der Antagonisten zugeschaltet werden, damit das Ziel genau erreicht wird. Daß die Einstellzeiten bei einer

Steuerung und bei einer Regelung gleich sein können, hat VOSSIUS (26) in seiner Untersuchung der Augenbewegung gezeigt, in der er ausführlich den Unterschied zwischen einer Regelung und einer Steuerung für die Bulbusbewegung behandelt hat. - Wir können nach unseren Ergebnissen nicht entscheiden, ob die Kraft bei der isometrischen Kontraktion geregelt oder gesteuert wird.

Bei der zusätzlich belasteten Bewegung des Armes hingegen kann man sicher eine Regelung annehmen, da bei dieser Kontraktionsform ein Weg zurückgelegt wird, also eine Rückmeldung über die MS erfolgt. Wir haben aus unseren Versuchen über die sprungförmige Kraftänderung die Laufzeit dieses Regelkreises mit 15 - 20 Millisekunden ermittelt. Da die Reaktionszeit des Menschen etwa 150 ms beträgt, kommt eine bewußte Reaktion nicht in Frage (HOFFMANN (12)) . HANSEN und HOFFMANN (10) haben die Reflexzeit für die Unterarmbeuger im Jahre 1920 mit 19 ms angegeben, FELIX (6) hat sie mit 15 - 17 ms bestimmt. Die von uns gemessene Laufzeit liegt also in der Größenordnung der Reflexzeit und ist kleiner als die von VOSSIUS (25) seinerzeit mit 26 - 30 ms angegebene Laufzeit des inneren Regelkreises, die aus einem vereinfachten Regelkreismodell berechnet wurde. Die Laufzeit kann sehr wohl etwa so groß wie die Reflexzeit sein. Denn der Reflex stellt ja den untersten in sich geschlossenen Regelkreis dar, den die Erregung bei sehr schnellen Bewegungen durchläuft. Bei den normal schnellen Bewegungen werden wahrscheinlich einige Zwischenneurone mehr einbezogen, da bei der gezielten, "sinnvollen" Willkürbewegung auch auf der Rückenmarksebene eine Verrechnung verschiedener Afferezen und

übergeordneter zentralnervöser Einflüsse vorgenommen werden muß. Die Laufzeit kann hier, bei einer Synapsenzeit von 0,5 - 0,9 ms (HOFFMANN (13)), durchaus etwas länger als die minimale Reflexzeit sein.

Z u s a m m e n f a s s u n g .

Es wurde das Verhalten der Kraft bei der willkürlichen Kontraktion der menschlichen Skelettmuskulatur unter Berücksichtigung der Regeltheorie untersucht. Folgende Kontraktionsformen wurden ausgewertet:

1. Isometrische Kontraktion:

- a) Die maximale Geschwindigkeit des Kraftanstieges ist bei den drei Vpn verschieden, sie nimmt mit steigenden Sollgewichten zu, doch ist eine feste Abhängigkeit zwischen der erreichten Kraft und der Geschwindigkeit der Kraftaufwendung nicht aufzustellen.
- b) Die Zeiten bis zum Erreichen eines Dauerwertes betragen 200 - 350 Millisekunden.
- c) Die Dauerabweichung beträgt 6 - 20 % . Die Werte liegen im Positiven wie im Negativen, es ist keine Tendenz der Abweichung zu erkennen.

2. Zusätzlich mit 10 bzw. 15 kg belastete auxotonische Kontraktion:

Die Abweichung beträgt für die Kraft 0,5 - 2 % ,
für den Weg 1 - 4 % .

3. Unbelastete Bewegung über einen Weg von 200 mm :

Die prozentuale Dauerabweichung beträgt 0,4 - 3,4 %.

Aus einem Vergleich der drei Kontraktionsformen wird ersichtlich, daß die Krafteinstellung am genauesten erfolgt, wenn eine Wegkomponente dabei ist, d. h. wenn eine Stellungsänderung der Gliedmaßen stattfindet. Die Wegeinstellung ist bei zusätzlicher Belastung ungenauer, hierbei scheint die Rückmeldung durch die Kraftrezeptoren als Störung einzugehen.

Eine Entscheidung, ob bei der isometrischen Kontraktion für die Krafteinstellung eine Regelung oder eine Steuerung vorliegt, kann man nach unseren Ergebnissen nicht eindeutig fällen, auch wenn das Vorliegen einer Regelung als wahrscheinlich angenommen werden kann.

Für die auxotonische Kontraktion wurde durch sprungförmige Änderung der Kraft die Totzeit des Regelkreises zu 15 - 20 Millisekunden ermittelt. Sie hat die Größe der Reflexzeit.

Herrn Prof. Dr. K. WEZLER und Herrn Dr. G. VOSSIUS bin ich für die Überlassung dieses interessanten Themas zu großem Dank verpflichtet. Ich danke Herrn Prof. Dr. K. WEZLER auch sehr für die großzügige Unterstützung, die er mir bei der Durchführung der Arbeit gewährt hat, und Herrn Dr. G. VOSSIUS für seine wertvollen Hinweise bei der Erstellung des Versuchsaufbaues und seine Hilfe bei der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s .

1. BARR, M. L.: J. of Anat. 74, 1, 1939
2. BOEKE zit. nach HASSLER (11)
3. BURCKHARDT, D.: Ergebn, d. Biol. **IX**, 27, 1958
4. ECCLES, J. C., FATT, P., LANDGREN, S. and WINSBURY, G.J.:
J. Physiol. Brit. 125, 590, 1953
5. ELDRED, E., GRANIT, R. and MERTON, P. A.:
J. Physiol. Brit. 122, 498, 1953
6. FELIX, K.: Z. Biol. 71, 231, 1923
7. GRAF, U. und HENNING, H. J.: Formeln und Tabellen mathematischer Statistik, Heidelberg 1958
8. GRANIT, R., HOLMGREN, B. and MERTON, P. A.:
J. Physiol. Brit. 130, 213, 1955
9. HÄGGQVIST, G.: Z. mikrosk.-anat. Forsch. 43, 49, 1938
10. HANSEN, K. und HOFFMANN, P.: Z. Biol. 71, 99, 1920
11. HASSLER, R.: in Handb. d. Inn. Med. V/3, 679, 1953
12. HOFFMANN, P.: Z. Biol. 68, 351, 1918
13. ders.: Der Nervenarzt 24/1, 19, 1953
14. HOLST, E. v. und MITTELSTAEDT, H.:
Die Naturwissensch. 37, 464, 1950
15. JANZING, J., KOBOR, J. und WAGNER, R.: Z. Biol. 112, 1, 1960
16. KÜPFMÜLLER, K.: Arch. elektr. Übertragung 7, 71, 1953
17. KÜPFMÜLLER, K. und POKLEKOWSKI, G.:
Z. f. Naturforsch. 11b, 1, 1956
18. LANDOIS - ROSEMAN : Physiologie des Menschen, München 1955
19. MAYNE, R.: Elect. Engng. 70, 207, 1951
20. MERTON, P. A.: A Ciba Foundation symposium, 247, Boston 1953.
Zit. nach BURCKHARDT (3).

21. OPPELT, W.: Kleines Handbuch technischer Regelungsvorgänge. Weinheim 1954.
22. ders.: Regelung in der Technik. Im: Regelungsvorgänge in der Biologie. München 1956
23. SCHÄFER, O.: Grundlagen der selbsttätigen Regelung. München 1956
24. TÖNNIES, J. F.: Arch. Psych. u. Z. Neurol. 182, 478, 1949
25. VOSSIUS, G.: Akad. d. Wiss. u. Lit. Mainz 4, 3, 1957
26. ders.: Z. Biol. 112, 1, 1960
27. ders.: Kybernetik 1, 28, 1961
28. VOSSIUS, G. und POKLEKOWSKI, G.: Z. Biol. 109, 458, 1957
29. VOSSIUS, G. und CHOUDHRY, A. S.:
Pflügers Arch. 268, 75, 1958
30. VOSSIUS, G. und WAGNER, H.: Z. Biol. 111, 23, 1959
31. WAGNER, R. : Z. Biol. 83, 59, 1925
32. ders.: Probleme und Beispiele biologischer Regelung
Stuttgart 1954.

Lebenslauf.

Am 26. Oktober 1936 wurde ich in Berlin als drittes Kind des jetzigen Vizepräsidenten bei der Deutschen Bundesbahn a. D. Dr. iur. Hugo Kratz und seiner Ehefrau Liselotte, geb. Neuhaus, geboren.

Nach unserer Evakuierung aus Berlin besuchte ich zuerst die einklassige Volksschule in Thunow/Hinterpommern und, nachdem wir nach Herborn/Dillkreis geflohen waren, die dortige Volksschule, anschließend das Realgymnasium für Jungen in Dillenburg. 1947 wurde ich in das humanistische Heinrich-von-Gagern-Gymnasium in Frankfurt/Main aufgenommen. 1954 trat ich in das Lessing-Gymnasium zu Frankfurt über, wo ich am 7. März 1956 die Reifeprüfung bestand.

Das Medizinstudium begann ich im Sommersemester 1956 an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität in Frankfurt. Nach fünf Studiensemestern bestand ich hier am 29. Oktober 1958 das Physikum. Im Sommersemester 1959 war ich an der Albert-Ludwig-Universität in Freiburg immatrikuliert. Seit dem Wintersemester 1959/60 bin ich wieder an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität eingeschrieben und beabsichtige, mein Studium mit dem ärztlichen Staatsexamen im Wintersemester 1961/62 zu beenden.

